

### Разработка и исследование формирователя сигналов на основе цифрового вычислительного синтезатора и двухкольцевой системы ИФАПЧ

Важным достоинством синтезаторов частот на основе двухкольцевой системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ) является существенное (по сравнению с однокольцевыми схемами) снижение уровня спектральной плотности мощности фазовых шумов (на 20-40 дБ/Гц) и уменьшение шага сетки формируемых частот в 10-ки раз [1]. Применение двухкольцевой системы ИФАПЧ в составе частотно-модулированных цифровых синтезаторов частот (ЧМЦСЧ) позволяет обеспечить, кроме снижения фазового шума вблизи несущей частоты, также увеличение скорости переключения рабочих частот и линеаризацию амплитудно-частотной модуляционной характеристики (АЧМХ) [2].

Также известно, что применение цифровых вычислительных синтезаторов частот (ЦВС) и ИФАПЧ в схемах формирователей сигналов позволяет достичь высоких качественных показателей в плане выходной частоты, разрешения по частоте и скорости перестройки, при этом упростить реализацию устройства и управление выходной частотой. Задачи анализа шумовых и динамических свойств синтезаторов частот на основе ЦВС и простейших однокольцевых систем ИФАПЧ решались в ряде публикаций [3, 4]. Представляется перспективным объединение важнейших преимуществ ЦВС и двухкольцевых ИФАПЧ в одном устройстве. Однако исследование ЦВС в сочетании с многокольцевыми системами ИФАПЧ в литературе освещено недостаточно.

Предлагаемая структурная схема формирователя сигналов на основе ЦВС и двухкольцевой системы ИФАПЧ представлена на рис. 1. Здесь приняты следующие обозначения: ОКГ – опорный кварцевый генератор; ИФМ – импульсно-фазовый модулятор; УПТ – усилитель постоянного тока; ИНВ – инвертор; ДФКД1,2 – делители частоты с фиксированными коэффициентами деления; ДДПКД2 – делитель частоты с дробно-кратным переменным коэффициентом деления; ЧФД1,2 – частотно-фазовые детекторы; ИМС – источник модулирующего сигнала; УА – управляемый аттенюатор; Ус1, Ус2 – усилители; ГУН1,2 – генераторы, управляемые напряжением. Цифрами 1 и 2 обозначена принадлежность блоков к первому и второму кольцам импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ1 и ИФАПЧ2),  $u_m$  и  $U$  – модулирующий и выходной сигналы формирователя соответственно.

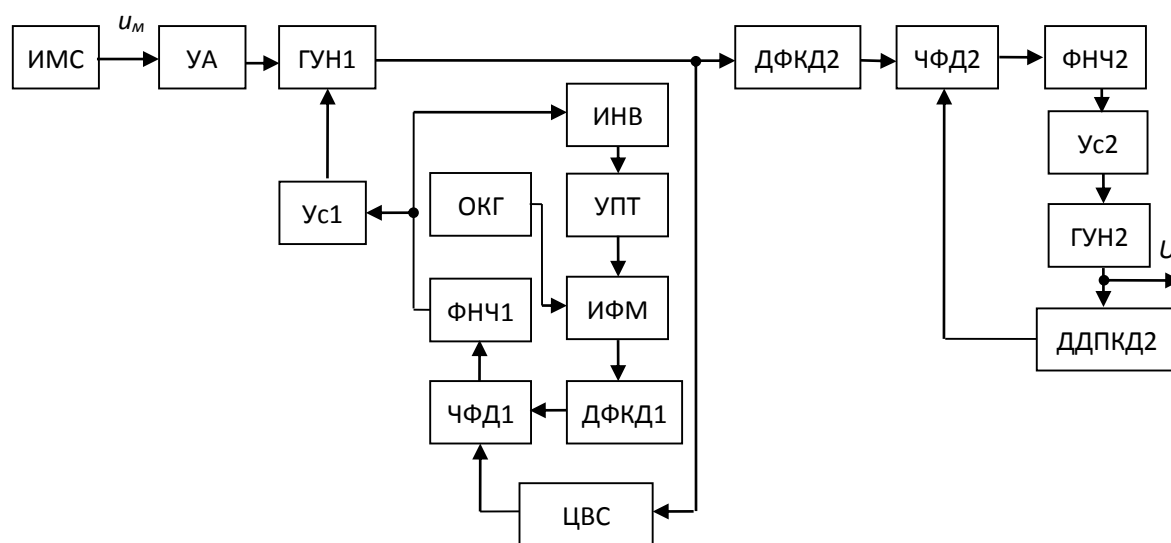


Рис. 1.

Схема рис. 1 получена на основе схемы двухкольцевого ЧМЦСЧ с автоматической компенсацией частотных искажений [2, 5] с помощью подстановки ЦВС в цепь обратной связи 1-

## Секция 7. Машиностроение и материаловедение

го кольца ИФАПЧ (вместо делителя с переменным коэффициентом деления ДПКД1).

На основе передаточных функций предложенного формирователя были построены соответствующие графики модуляционных характеристик для четырех значений параметров звеньев синтезатора и компенсационного тракта (образованного блоками ЧФД1, ФНЧ1, ИНВ, УПТ, ИФМ, ДФКД1). Проведенные исследования подтвердили эффективность использования автокомпенсаторов для линеаризации АЧМХ и повышения быстродействия двухкольцевых цифровых синтезаторов частот.

*Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-05542*

### Литература

1. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Коробкова Е.В. Исследование шумовых характеристик двухкольцевой системы ИФАПЧ. – Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2012, №3.
2. Курилов И.А., Анисимов С.Л. Автоматическая компенсация частотных искажений в двухкольцевых частотно-модулированных цифровых синтезаторах частот. – Радиотехника, 2008, № 9.
3. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
4. Ромашова Л.В., Ромашов А.В., Фомичев А.Н. Исследование шумовых свойств однокольцевой ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2011, №2. – С. 20 – 24.
5. Анализ характеристик синтезаторов частот на основе схемы амплитудно-фазового преобразователя сигналов. – М.: Радиопромышленность. – №2, 2012.

### Исследование формирователя сигналов на основе ЦВС и ФАПЧ с дополнительным каналом авторегулирования фазы

Совместное применение цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) и системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в устройствах формирования высокостабильных сигналов позволяют достичь высокой частоты выходного колебания (до 20 ГГц и более), разрешения по частоте и скорости перестройки, однако задача снижения уровня фазовых шумов остается актуальной. Авторами предложен автокомпенсационный способ уменьшения паразитных флуктуаций фазы выходного сигнала формирователя, обусловленный шумовым вкладом ЦВС [1]. Важными достоинствами нового способа по сравнению с известными подходами (например, пассивной фильтрацией или рандомизацией выходного спектра) является сохранение полезной амплитудной модуляции синтезируемого сигнала, а также возможность подавления фазовых помех, вызванных воздействием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов различной природы с произвольными статистическими свойствами.

Исследования показали, что кроме ЦВС существенный вклад в общий уровень фазовых шумов цифровых вычислительных и гибридных синтезаторов частот часто вносит опорный генератор (ОГ) [2].

В работе [3] простейшая однопетлевая система ФАПЧ дополнена каналом авторегулирования фазы выходного сигнала. Это частично разрешает противоречие между устойчивостью, шириной полосы захвата и высокой помехоустойчивостью, что позволяет значительно улучшить фильтрацию помех на выходе устройства, в том числе вызванных нестабильностью опорного сигнала.

Целесообразно объединить каналы компенсации нежелательных фазовых сдвигов ЦВС и ФАПЧ в одном устройстве синтеза частот для одновременного подавления фазовых шумов ОГ и ЦВС и улучшения качества выходного спектра по сравнению с существующими решениями.

Структурная схема формирователя сигналов на основе ЦВС и ФАПЧ с компенсацией фазовых шумов показана на рис. 1. Схема включает в себя ОГ, управляемый фазовращатель УФВ, фазовые дискриминаторы ФД1 и ФД2, фильтры системы ФАПЧ  $\Phi_c$ , канала управления  $\Phi_y$  и канала модуляции  $\Phi_m$ , усилители каналов управления и модуляции  $U_y$  и  $U_m$ , сумматор управляющего и модулирующего сигналов  $S$ , генератор, управляемый напряжением (ГУН), делитель с переменным коэффициентом деления (ДПКД), опорный и информационный тракты (ОТ и ИТ), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) в составе ЦВС, полосовой фильтр (ПФ) для выделения основной частоты ЦВС или ее образа.

Тракты ОТ и ИТ формируют импульсы прямоугольной формы с одинаковой амплитудой и частотой на входах ФД2. Паразитные фазовые отклонения выходных сигналов ФАПЧ и ЦВС могут быть скомпенсированы противофазным изменением задержки сигнала в УФВ.

В соответствии со структурной схемой (рис. 1), передаточные функции формирователя для фазовых шумов ОГ и ЦВС определяются выражениями

$$H_{OG}(p) = \frac{N_{ДПКД} K_{ЦВС}}{1 + \frac{pT_c N_{ДПКД} [1 + N_y M_y(p)]}{M_c(p)}}, \quad H_{ЦВС}(p) = \frac{1}{1 + H_{раз}(p)},$$

$$\text{где } H_{раз}(p) = \frac{N_{ДПКД} N_m M_m(p)}{1 + \frac{pT_c N_{ДПКД} [1 + N_y M_y(p)]}{M_c(p)}} - \text{коэффициент передачи разомкнутой цепи}$$

компенсации помехи ЦВС,  $N_{ДПКД}$  - коэффициент деления частоты ДПКД и коэффициент умножения частоты петли ФАПЧ,  $K_{ЦВС}$  - коэффициент умножения тактовой частоты ЦВС,  $N_y$  и  $N_m$  - коэффициенты петлевого усиления каналов управления и модуляции формирователя,  $M_c(p)$ ,  $M_y(p)$  и  $M_m(p)$  - передаточные функции фильтров системы ФАПЧ, каналов управления и модуляции соответственно,  $T_c$  - постоянная времени кольца ФАПЧ.



**Анализ параметрической чувствительности формирователя сигналов на основе ЦВС с автокомпенсацией фазовых помех**

Наиболее распространенными методами подавления помех на выходе цифрового вычислительного синтезатора частот (ЦВС) является фильтрация выходного сигнала синтезатора, а также компенсация данных помех. Метод автоматической компенсации помех сочетает достоинства предыдущих, такие как простота схемы и возможность компенсации помех с частотой, близкой к основной частоте сигнала, и может применяться вместе с фильтрацией [1]. Исследованная в работе [1] схема автокомпенсатора фазовых помех (АК) с регулированием по отклонению обладает статической ошибкой компенсации, ограниченным быстродействием и проблемой устойчивости при больших коэффициентах регулирования, что ограничивает максимальную частоту синтезируемого сигнала ЦВС.

Структурная схема формирователя сигналов на основе АК с регулированием по возмущению (РВ) (рис. 1) содержит устройство управления задержкой (УУЗ), опорный тракт (ОТ), информационный тракт (ИТ), управляющий тракт (УТ) и фазовый детектор (ФД). Также на схеме обозначены ОГ - опорный генератор, УЧ1 – входной умножитель частоты на ФАПЧ, УЧ2 – выходной умножитель частоты на биполярном транзисторе, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь в составе ЦВС, ПФ – полосовой фильтр для выделения основной частоты ЦВС или ее образа. Шумовые характеристики АК с РВ существенно зависят от коэффициента регулирования, что определяет необходимость исследования чувствительности устройства к изменению данного параметра.

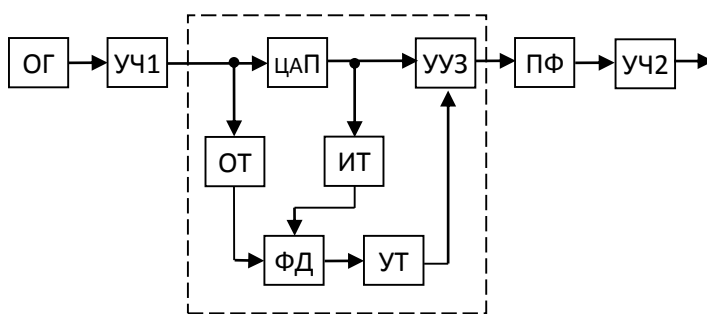


Рис. 1

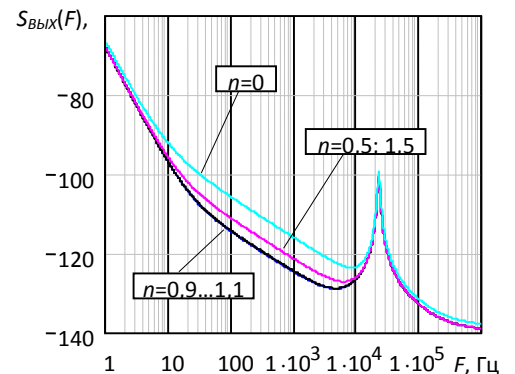


Рис. 2

Тракты ОТ и ИТ формируют прямоугольные импульсы с одинаковой амплитудой и частотой на входах ФД. Управляющий тракт УТ состоит из фильтра нижних частот (ФНЧ) и усилителя постоянного тока (УПТ). Паразитное фазовое отклонение выходного сигнала ЦВС может быть скомпенсировано противофазным изменением задержки сигнала в УУЗ.

Зависимость спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых флуктуаций на выходе формирователя от частоты отстройки  $F$  при воздействии некоррелированных помех отдельных блоков имеет вид

$$S_{\text{вых}}(F) = \{S_{\text{ог}}(F)N_{\text{уч1}}^2 H_{31}^2(F) + S_{\text{уч1}}(F) + S_{\text{ууз}}(F) + S_{\text{упт}}(F)K_{\text{ууз}}^2 + S_{\text{фд}}(F)K_{\text{упт}}^2 K_{\text{ууз}}^2 |M_1(F)|^2 + 2S_{\text{тр}}^*(F) + S_{\text{цвс}}(F) \times |H_{\text{ак}}(F)|^2\} N_{\text{уч2}}^2 + S_{\text{уч2}}(F), \quad (1)$$

где символами  $S$  обозначены СПМ фазовых флуктуаций соответствующих блоков,  $K$  с нижним индексом - коэффициент передачи соответствующего блока формирователя,  $N_{\text{уч1}}$  и  $N_{\text{уч2}}$  - коэффициенты умножения УЧ1 и УЧ2,  $S_{\text{тр}}^*(F)$  - шумовой вклад Т-триггеров в ОТ и ИТ,  $H_{\text{ак}}(p) = 1 - N_1 M_1(p)$  - передаточная функция АК по внешним шумам,  $N_1$  - коэффициент регулирования по возмущению,  $M_1(p)$  - коэффициент передачи ФНЧ в УТ.

Модель фазового шума УЧ1 на ФАПЧ  $S_{\text{уч1}}(F)$  и передаточная функция ФАПЧ по внешним шумам  $H_{31}(p)$  приведены в [3]. Использованные соотношения для расчета СПМ собственных фазовых шумов опорного кварцевого генератора, цифрового фазового детектора и делителя

## Секция 7. Машиностроение и материаловедение

частоты, высокочастотного усилителя представлены суммой рациональных функций от частоты отстройки в [4]. В качестве модели СПМ фазовой помехи УУЗ используется шумовая модель высокочастотного усилителя. Для расчета СПМ фазового шума генератора, управляемого напряжением, системы ФАПЧ при произвольной отстройке от несущей использована степенная аппроксимация табличных шумовых параметров ГУН модели ROS-244+, взятых с сайта фирмы Mini-Circuits. Также используется выражение, аппроксимирующее СПМ фазового шума ЦВС модели AD9854 [3].

Моделирование проводилось для следующих значений параметров блоков формирователя:  $f_{ог} = 100$  МГц,  $K_{ЦВС} = 0,31$ ,  $N = 12$ ,  $N_{уч1} = 2$ ,  $N_{уч2} = 5$ , частоты среза ФНЧ автокомпенсатора и ФАПЧ – 100 кГц и 10 кГц соответственно,  $K_{ФД} = K_{УУЗ} = 1$ ,  $K_{ГУН} = 4$  МГц/В.

На основе сравнения слагаемых выражения (1) определено, что наибольший вклад в уровень фазового шума на выходе формирователя вносят УУЗ, УПТ, ОГ и УЧ1 [1, 2]. В отличие от варианта автокомпенсатора с регулированием по отклонению [], в рассматриваемом устройстве фазовые помехи УУЗ и УПТ не подавляются из-за отсутствия цепи обратной связи, Помеха ЦВС в значительной мере (до 80 дБ/Гц при малых отстройках от несущей) подавляется в цепи автокомпенсации.

Зависимости СПМ фазовых флуктуаций на выходе формирователя от частоты отстройки  $S_{вых}(F)$  показаны на рис. 2. Исследования проводились при различных значениях коэффициента регулирования  $n = n_{УПТ} / (2K_{ЦВС})$ , где  $n_{УПТ}$  – коэффициент усиления УПТ; кривая  $n = 0$  соответствует отсутствию компенсации,  $n = 1$  – условию полного подавления помехи ЦВС.

Установлено, что степень компенсации фазовой помехи ГСЧ максимальна при условии полного подавления помехи ЦВС  $n_{УПТ} = 2K_{ЦВС}$  и достигает 6,8 дБ/Гц при частоте отстройки  $F = 200$  Гц. При изменении  $n$  происходит уменьшение степени компенсации: на 0,75 дБ/Гц при уменьшении или увеличении  $n$  на 0,2 ( $n = 0,8 \dots 1,2$ ). Требования к точности установки коэффициента усиления УПТ при разработке формирователя по схеме рис. 1 и изменения данного коэффициента при перестройке выходной частоты ЦВС существенно менее жесткие по сравнению с гибридным синтезатором [5]. Проведенный анализ шумовых свойств формирователя подтвердил эффективность предложенной схемы устройства при соблюдении данных требований.

*Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-05542.*

### Литература

1. Курилов И.А., Рудаков А.М., Харчук С.М., Романов Д.Н. Математическое моделирование автокомпенсации фазовых помех на выходе ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2013. – С. 19-25.
2. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М. Моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2, 2014. – С. 30-38.
3. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №1, 2014. – С. 5-20.
4. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
5. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I., Kharchuk S.M. The analysis of the parametric sensitivity of a hybrid frequency synthesizer with autocompensating phase noise / 25th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015). – Sevastopol, September 6 – 12, 2015. – pp. 209-211. – IEEE Catalog Number: CFP15788-PRT, CFP15788-CDR. – ISBNs: 978-1-4673-9413-0 (CD), 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4.



### Оптимизация опорного тракта формирователя сигналов с ФАПЧ, ЦВС и автокомпенсацией помех

Формирователи сигналов на основе цифровых вычислительных синтезаторов частот (ЦВС) с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) обладают высокой частотой выходных колебаний, высокими разрешениями по частоте и скоростью перестройки [1]. Применение автоматической компенсации помех ЦВС позволяет уменьшить уровень нежелательных составляющих в спектре, повысить качество выходного сигнала [2,3].

Структурная схема формирователя сигналов с ФАПЧ, ЦВС и автокомпенсацией помех представлена на рис. 1. На схеме обозначено ОГ - опорный генератор, ФД1 и ФД2 – фазовые детекторы системы ФАПЧ и автокомпенсатора помех (АКП), Ф1 и Ф2 – фильтры ФАПЧ и АКП, ГУН – генератор управляемый напряжением, УФ – управляемый фазовращатель, ИТ – информационный тракт, У – усилитель постоянного тока,  $\varepsilon_{ог}$ ,  $\varepsilon_{уч}$  и  $\varepsilon_{у}$  – дестабилизирующие факторы ОГ, УЧ и УФ. Схема реализует принцип регулирования по отклонению.

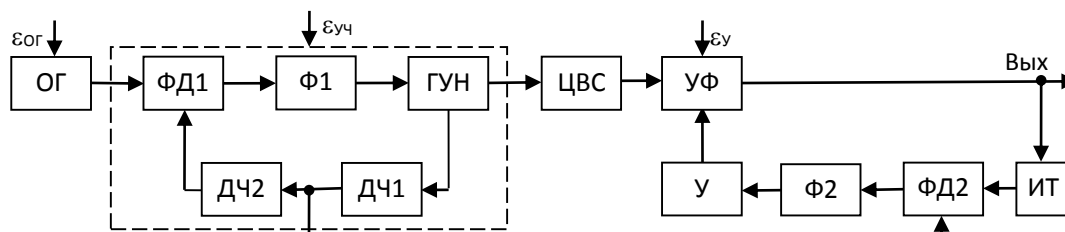


Рис. 1.

Принципы действия автокомпенсатора заключается в выделении закона помехи и противофазном управлении фазой выходного сигнала ЦВС. При этом нежелательное отклонение фазы сигнала ЦВС компенсируется. Помехи амплитудного характера могут быть устранены ограничителем амплитуды сигнала.

Информационный тракт включает в себя последовательно соединенные дифференцирующую цепь, двухполупериодный выпрямитель и триггер. Это позволяет от многоуровневого выходного сигнала ЦВС перейти к двухуровневому сигналу с сохранением закона фазового отклонения. Система ФАПЧ в данной схеме используется в качестве умножителя частоты сигнала ОГ. В качестве опорного тракта (ОТ), формирующего опорный сигнал ФД2 обычно используется последовательно соединенные дифференцирующая цепь, однополупериодный выпрямитель и триггер [2]. В разработанной схеме для формирования опорного сигнала ФД2 используется делитель частоты ФАПЧ. Сигнал снимается с первого каскада ДЧ1, что позволило оптимизировать ОТ и исключить 3 каскада формирования.

На основе обобщенной схемы амплитудно-фазового преобразователя и аппарата непрерывных кусочно-линейных функций (НКЛФ) получены выражения передаточных характеристик формирователя. Рассмотрены условия эффективного подавления помех ЦВС. Определены требования к структуре и параметрам фильтров системы ФАПЧ и АКП.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-05542*

#### Литература

1. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А., Коровин А.Н. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на интегральных микросхемах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013, №1. – С. 10-15.
2. Рудаков А.М., Курилов И.А., Харчук С.М., Романов Д.Н. Математическое моделирование автокомпенсации фазовых помех на выходе ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2013. – С. 19-25.
3. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М. Моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2, 2014. – С. 30-38.



### Использование синтезаторов на основе ФАПЧ и ЦВС с автоматической компенсацией фазовых искажений в качестве формирователей сигналов

Формирователи сигналов является составной частью радиотехнических систем, к которым относятся мобильные средства связи, прецизионные измерительные устройства, системы радионавигации и радиолокации. Условия функционирования и тип решаемых задач с помощью РТС накладывают жесткие ограничения и требования на применяемые в качестве формирователей синтезаторы по диапазону выходных частот, шагу перестройки в относительно узкой полосе, уровню искажений и фазового шума, времени переключения между частотами. Достижение указанных требований является трудной задачей и может потребовать применения сложных и дорогостоящих технических решений. Так при использовании синтезатора на основе петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) не просто реализовать малый шаг переключения, а применение цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) для достижения высокого выходного частотного диапазона потребует введения в схему дополнительного умножения частоты, что негативно скажется на уровне искажений и фазовых шумов.

Рассмотрим возможность применения в качестве формирователей сигналов ЦВС с автоматической компенсацией фазовых искажений [1,2]. Необходимость применения автокомпенсатора обусловлена тем, что полезный сигнал, проходя через блоки ЦВС, искажается, причем наибольшее влияние на спектральную чистоту оказывают фазовые ошибки некратности и нелинейности цифро-аналогового преобразования. Предлагается реализовать автоматическую компенсацию фазовых искажений ЦВС с регулировкой вперед и устройством управления в виде петли ФАПЧ. Структурная схема устройства представлена на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: ОГ - опорный тактовый генератор, ДЦ - дифференцирующая цепь, Тр - триггер, ДВ - двухполупериодный выпрямитель, ФД - фазовый детектор, ФНЧ - фильтр нижних частот, УПТ - усилитель постоянного тока.

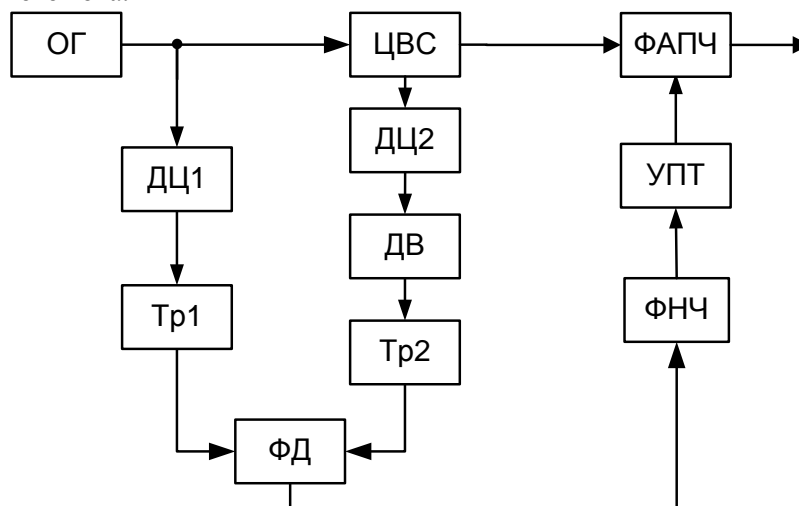


Рис. 1.

Автокомпенсатор фазовых искажений ЦВС содержит в своем составе опорный, информационный и управляющий тракты [1-4]. Опорный тракт включает в себя ДЦ1 и Тр1. Информационный тракт состоит из ДЦ2, ДВ и Тр2 [3]. Управляющий сигнал формируется в ФД, ФНЧ и УПТ [3]. Компенсация фазового отклонения ЦВС основана на выделении закона паразитного отклонения фазы выходного сигнала ЦВС и последующем управлении модулирующим сигналом генератора, управляемого напряжением системы ФАПЧ.

В таком случае кольцо ФАПЧ одновременно выполняет роль устройства управления задержкой и высокоэффективного фильтра нижних частот по отношению к входным паразитным спектральным составляющим и шумам как ЦВС, так и опорного генератора. Добавление в петлю

## Секция 7. Машиностроение и материаловедение

обратной связи системы автоподстройки делителя частоты позволяет получить гибридный синтезатор частот на основе ЦВС и ФАПЧ. Высокая разрешающая способность ЦВС по частоте обеспечивает высокую разрешающую способность даже после значительного умножения в системе ФАПЧ. При этом диапазон выходных частот останется типичным для ФАПЧ. При использовании малошумящего генератора, управляемого напряжением, такая схема (рис. 1) является самым простым решением формирователя сигналов.

### Литература

1. Surzhik D.I., Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. Design and mathematical modeling of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of DDS interferences // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. –Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. - IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

2. Surzhik D. I., Vasilyev G. S., Kurilov I. A., Kharchuk S. M. Automatic compensation of phase noise of DDS of hybrid frequency synthesizer with mixer // 25th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015). – Sevastopol, September 6 – 12, 2015. – pp. 209-211. – IEEE Catalog Number: CFP15788-PRT, CFP15788-CDR. – ISBNs: 978-1-4673-9413-0 (CD), 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. Pp. 207-208.

3. Рудаков А.М., Курилов И.А., Харчук С.М., Романов Д.Н. Математическое моделирование автокомпенсации фазовых помех на выходе ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2013. – С. 19-25.

4. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М. Моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2014. – С. 30-38.

### Исследование влияния параметров узлов автокомпенсатора на уровень фазового шума ЦВС

Степень компенсации фазовых искажений цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС) определяется точностью установки параметров звеньев автокомпенсатора, что обуславливает необходимость исследования параметрической чувствительности. Автокомпенсатор фазовых искажений прямого цифрового синтезатора содержит в своем составе опорный и информационный тракты [1-3]. Опорный тракт включает в себя дифференцирующую цепь и триггер. Информационный тракт состоит из дифференцирующей цепи, двухполупериодного выпрямителя и триггера. Компенсация фазового отклонения основана на выделении закона паразитного отклонения фазы выходного сигнала ЦВС и последующем вычитании выделенного (управляющего) сигнала из сигнала системы фазовой автоподстройки непосредственно перед его подачей на генератор, управляемый напряжением. Управляющий сигнал формируется в фазовом детекторе, фильтре нижних частот и усилителе постоянного тока (УПТ) [1,2].

В работе рассмотрено влияние коэффициента усиления УПТ и постоянной времени фильтра автокомпенсатора фазовых искажений на степень компенсации и спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых флуктуаций на выходе гибридного синтезатора. На рис. 1а) изображена графическая зависимость СПМ фазовых флуктуаций на выходе гибридного синтезатора с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ при изменении коэффициента усиления УПТ  $n_U$  относительно условий полной компенсации. Для моделирования приняты следующие параметры устройства: коэффициент умножения тактовой частоты ЦВС  $K_{ЦВС} = 0.2$ , крутизна модуляционной характеристики ГУН системы ФАПЧ  $K_G = 15$  МГц/В, коэффициент регулирования  $n = 0.95n_U$ , частота опорного генератора  $f_{OG} = 100$  МГц, и  $f_{ГУН} = 1$  ГГц. На рис. 1б) представлены зависимости степени подавления фазовых искажений ЦВС при изменении коэффициента усиления УПТ

$$B_\varphi(F) = 10 \log(S_{\text{вых}}^*(F)) - 10 \log(S_{\text{вых}}(F)), \quad (1)$$

где  $S_{\text{вых}}^*(F)$  – зависимость СПМ фазовых шумов на выходе гибридного синтезатора с разомкнутой цепью автокомпенсации,  $S_{\text{вых}}(F)$  – с замкнутой.

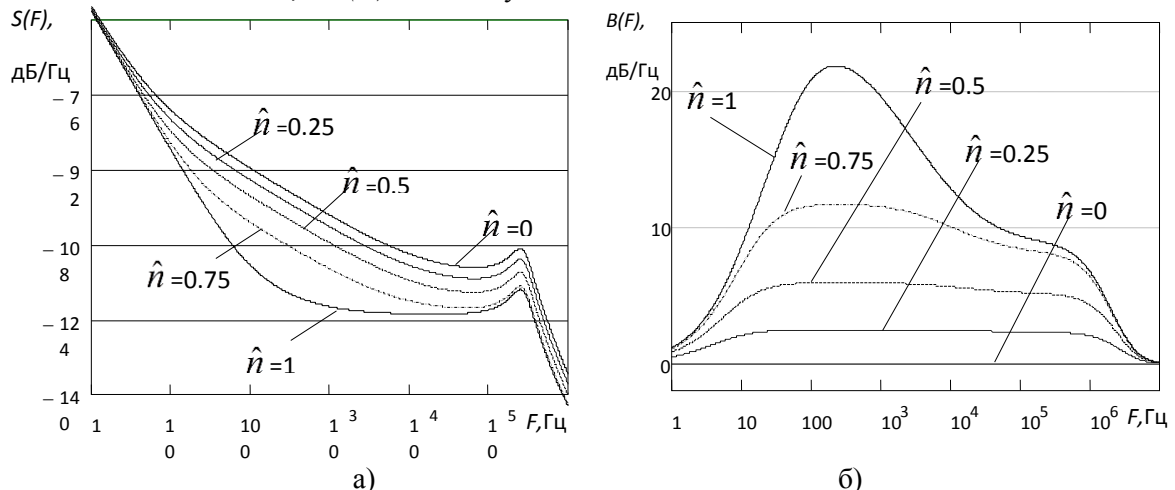


Рис. 1.

Кривые при  $n = 0$  соответствует отсутствию компенсации, при  $n = 1$  – условию полного подавления искажений ЦВС. Степень компенсации фазовых искажений ЦВС максимальна при условии полного подавления  $n_U = 2K_{ЦВС}$  и достигает 22,5 дБ/Гц для данных параметров устройства. При изменении  $n$  происходит уменьшение степени компенсации до 2,5 дБ/Гц при уменьшении  $n$  до  $0,25n_U$ .

На рис. 2 представлены графические зависимости СПМ выходного сигнала гибридного синтезатора и степени компенсации искажений ЦВС при вариации постоянной времени фильтра цепи автокомпенсации относительно условий полного подавления.

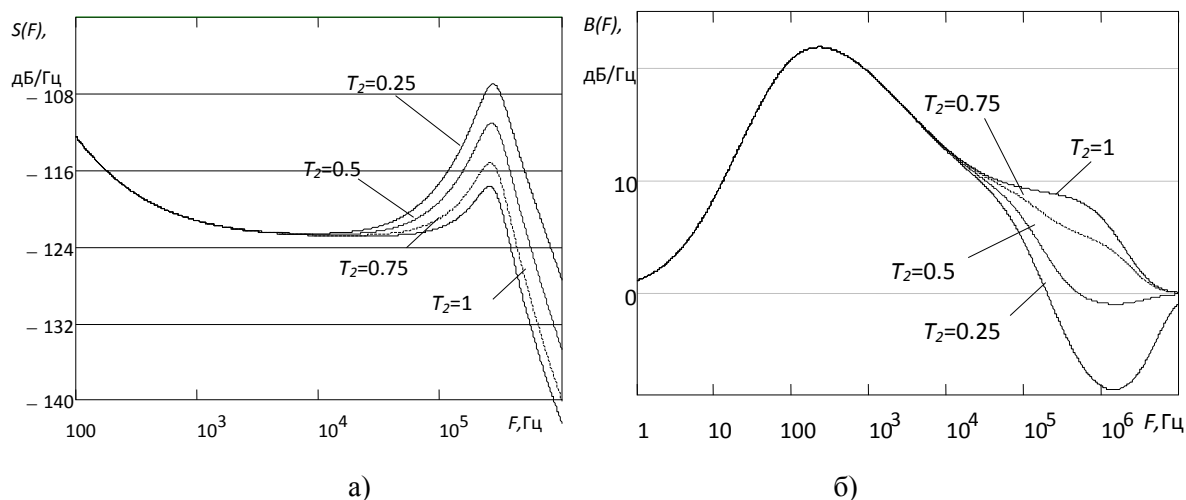


Рис. 2.

При изменении постоянной времени фильтра автокомпенсатора уровень подавления искажений ЦВС сохраняется в большом диапазоне отстроек (до 10 кГц). В полосе больших отстроек наблюдается ухудшение компенсации при отклонении значений изменяемого параметра от условий полного подавления. При  $T_2 = 0.5T_1$  и меньших значениях образуется узкая область отстроек с отрицательной компенсацией.

Теоретические значения максимального подавления фазовых шумов в выходном сигнале устройств при выполнении условий полной компенсации для гибридных синтезаторов с автоматической компенсацией фазовых искажений ЦВС в качестве опорного генератора системы фазовой автоподстройки составляют 30 дБн/Гц, для схемы с ЦВС в качестве делителя частоты петли обратной связи - 25 дБн/Гц, для устройства с ЦВС в качестве генератора подставки – до 20 дБн/Гц.

#### Литература

1. Vasilyev G. S., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I., Kharchuk S.M. The analysis of parametric sensitivity of a hybrid frequency synthesizer with autocompensating phase noise // 25th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015). – Sevastopol, September 6 – 12, 2015. – pp. 209-211. – IEEE Catalog Number: CFP15788-PRT, CFP15788-CDR. – ISBNs: 978-1-4673-9413-0 (CD), 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4.- Pp. 209-210.
2. Surzhik D.I., Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. Design and mathematical modeling of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of DDS interferences // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. –Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. - IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.
3. Surzhik D. I., Vasilyev G. S., Kurilov I. A., Kharchuk S. M. Automatic compensation of phase noise of DDS of hybrid frequency synthesizer with mixer // 25th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015). – Sevastopol, September 6 – 12, 2015. – pp. 209-211. – IEEE Catalog Number: CFP15788-PRT, CFP15788-CDR. – ISBNs: 978-1-4673-9413-0 (CD), 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4.- Pp. 207-208.

### Шумовые характеристики гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и ЦВС с автоматической компенсацией фазовых искажений

Гибридные синтезаторы частот обладают достоинствами применяемых в них цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которые позволяют достичь высокого значения выходной частоты, упростить реализацию синтезатора, управление им, при этом получить достаточно низкий уровень фазовых шумов [1,2].

Важным параметром гибридных синтезаторов, определяющим качество работы устройства, является фазовый шум [3,4], оказывающий значительное влияние на выходные характеристики устройств. Основной характеристикой уровня фазовых флуктуаций является спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов выходного сигнала вблизи несущей частоты в зависимости от отстройки при различных значениях выходной частоты [3]. Каждый блок гибридного синтезатора вносит собственный вклад в результирующий выходной фазовый шум.

Разработаны 3 схемы гибридных синтезаторов частот на основе петли ФАПЧ и автоматической компенсации фазовых искажений ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ, делителя частоты цепи обратной связи и генератора подставки. Для исследования шумовых характеристик данных гибридных синтезаторов частот составлены их эквивалентные функциональные схемы со всеми источниками действующих фазовых шумов.

Поскольку все шумы, генерируемые или добавляемые каждым компонентом схемы малы по сравнению с мощностью полезного сигнала, в соответствии с правилом наложения их можно добавлять к соответствующим входным или выходным воздействиям [1-4]. На основе эквивалентных схем получены результирующие выражения для СПМ фазовых флуктуаций гибридных синтезаторов с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС при воздействии некоррелированных возмущений основных блоков устройства.

Для схемы гибридного синтезатора с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС в качестве опорного генератора системы ФАПЧ получили

$$S_{\text{вых}}(F) = \left( S_{\text{ог}}(F) \cdot K_{\text{цвс}}^2 + S_{\text{цвс}}(F) \cdot \left( \frac{n}{2K_{\text{цвс}}} - 1 \right)^2 + S_{\text{фд1}}(F) + S_{\text{дч}}(F) + S_{\text{фд2}}(F) \cdot n^2 \right) \cdot |H_{31}(F)|^2 + \left( S_{\text{гун}}(F) + S_{\text{упт}}(F) \cdot \left( \frac{K_r}{p} \right)^2 \right) \cdot |H_{32}(F)|^2, (1)$$

где символами  $S$  и  $H$  с нижними индексами обозначены СПМ фазовых шумов и передаточные функции соответствующих блоков,  $K_r$  - крутизна управляющей характеристики ГУН,  $p$  - оператор Лапласа,  $M_{(p)}$  - коэффициент передачи фильтра в кольце фазовой автоподстройки,  $K_{д1}$  - крутизна дискриминационной характеристики фазового детектора ФАПЧ;  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  - коэффициенты деления частоты ФАПЧ,  $n$  - коэффициент усиления постоянного тока автокомпенсатора,  $K_{\text{цвс}}$  - коэффициент передачи ЦВС,  $n_1$  - коэффициент умножения в цепи смещения;

$$H_{31}(p) = \frac{H_1(p)N_2}{1 + H_1(p)} - \text{передаточная функция кольца ФАПЧ по внешним шумам};$$

$$H_{32}(p) = \frac{1}{1 + H_1(p)} - \text{передаточная функция кольца ФАПЧ по внутренним шумам};$$

$$H_1(p) = \frac{M_1(p)K_r K_{д1}}{pN_2} - \text{передаточная функция разомкнутого кольца ФАПЧ}.$$

Для схемы гибридного синтезатора с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС в качестве делителя частоты петли обратной связи системы ФАПЧ

## Секция 7. Машиностроение и материаловедение

$$S_{\text{ВЫХ}}(F) = \left( \frac{S_{\text{ОР}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ДЧ1}}(F) + S_{\text{ФД1}}(F) + S_{\text{ДЧ2}}(F)K_{\text{ЦВС}}^2 + S_{\text{ЦВС}}(F) \cdot \left( \frac{n}{2K_{\text{ЦВС}}} - 1 \right)^2 + S_{\text{ФД2}}(F) \cdot n^2 \right) \cdot |H_{31}(F)|^2 + \left( S_{\text{ГВН}}(F) + S_{\text{ВПП}}(F) \cdot \left( \frac{K_{\Gamma}}{p} \right)^2 \right) \cdot |H_{32}(F)|^2, (2)$$

где  $H_{31}(p) = \frac{H_1(p)N_2}{(1+H_1(p))K_{\text{ЦВС}}}$ ,  $H_{32}(p) = \frac{1}{1+H_1(p)}$ ,  $H_1(p) = \frac{M_1(p)K_{\Gamma}K_{\text{Д1}}K_{\text{ЦВС}}}{pN_2}$ .

Для схемы гибридного синтезатора с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС в качестве генератора подставки системы ФАПЧ

$$S_{\text{ВЫХ}}(F) = \left( S_{\text{ОР}}(F) \left( \frac{1}{N_1} + \frac{n_1 K_{\text{ЦВС}}}{N_2} \right)^2 + S_{\text{ДЧ1}}(F) + S_{\text{ФД1}}(F) + S_{\text{ДЧ2}}(F) + \frac{S_{\text{СМ}}(F) + S_{\text{ДЧ3}}(F)}{N_2^2} + S_{\text{ВЧ}}(F) \frac{K_{\text{ЦВС}}^2}{N_2^2} + S_{\text{ЦВС}}(F) \cdot \left( \frac{nN_2}{2K_{\text{ЦВС}}} - 1 \right)^2 + S_{\text{ФД2}}(F) \cdot n^2 \right) \cdot |H_{31}(F)|^2 + \left( S_{\text{ГВН}}(F) + S_{\text{ВПП}}(F) \cdot \left( \frac{K_{\Gamma}}{p} \right)^2 \right) \cdot |H_{32}(F)|^2, (3)$$

где  $H_{31}(p) = \frac{H_1(p)N_2N_3}{1+H_1(p)}$ ,  $H_{32}(p) = \frac{1}{1+H_1(p)}$ ,  $H_1(p) = \frac{M_1(p)K_{\Gamma}K_{\text{Д1}}}{pN_2N_3}$ .

Определены шумовые вклады всех составляющих звеньев для трех разработанных схем гибридных синтезаторов на основе ФАПЧ и ЦВС с автоматической компенсацией фазовых искажений, проведено моделирование шумовых характеристик. Основные соотношения СПМ входящих в схему блоков взяты из [3], также использована модель спектральных характеристик ЦВС из [1]. Исследования шумовых вкладов отдельных блоков показали, что предложенная схема автокомпенсатора подавляет паразитное фазовое отклонение на выходе ЦВС на  $10 \log(1 + N_p)$  дБ, при этом создавая собственные небольшие шумы фазового детектора и усилителя постоянного тока. Установлено, что наибольшим уровнем фазовых шумов обладает гибридный синтезатор с ЦВС в качестве опорного генератора системы ФАПЧ, наименьшим - с ЦВС в качестве генератора подставки.

### Литература

1. Ромашов В. В., Ромашова Л. В., Храмов К. К., Докторов А. Н., Якименко К. А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2014. – С. 30-38.

2. Surzhik D.I., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. Modeling the noise properties of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of phase noise of DDS // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. –Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. - IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

3. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

4. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I., Kharchuk S.M. Modeling of noise properties of the signals former based on direct digital frequency synthesizer with autocompensating phase noise // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. –Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. - IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

### Сравнительный анализ формирователей сигналов на основе ЦВС и ФАПЧ по уровню фазового шума

В [1-3] описаны структурные схемы формирователей сигналов на основе гибридных синтезаторов частот (ГСЧ) с кольцом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и автоматической компенсации фазовых искажений (АКФИ) цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС). Для оценки эффективности их применения проведем сравнительную оценку шумовых характеристик формирователя с ЦВС в качестве опорного генератора петли ФАПЧ при наличии и отсутствии цепи автокомпенсации с одной из практических схем.

Формирователи сигналов (ФС) строятся по обобщенной схеме, изображенной на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: ОГ - опорный генератор; ФСЧ - формирователь сетки частот; УЧ1 и УЧ2 - умножители частот ОГ и ФСЧ соответственно.

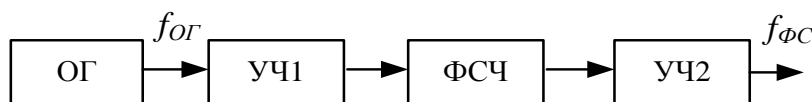


Рис. 1.

Одним из наиболее часто используемых формирователей является вариант построения схемы рис. 1, где в качестве ФСЧ используется ЦВС, а УЧ1 для повышения тактовой частоты ЦВС реализован на ФАПЧ [4]. Данная схема содержит одинаковые структурные элементы со схемой гибридного синтезатора с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ.

Для исследования шумовых характеристик составлены эквивалентные функциональные схемы обоих формирователей со всеми источниками действующих фазовых шумов, установлен шумовой вклад составляющих звеньев формирователей и получены выражения спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых флуктуаций на выходе устройств. На рис. 2 приведены результаты моделирования шумовых характеристик исследуемых схем с фильтром нижних частот 1-го порядка и выходными частотами 800 и 2720 МГц. Для моделирования приняты следующие параметры устройства: коэффициент умножения тактовой частоты ЦВС  $K_{ЦВС} = 0.2$ , крутизна модуляционной характеристики ГУН системы ФАПЧ  $K_f = 8$  МГц/В, частота опорного генератора  $f_{ог} = 50$  МГц.

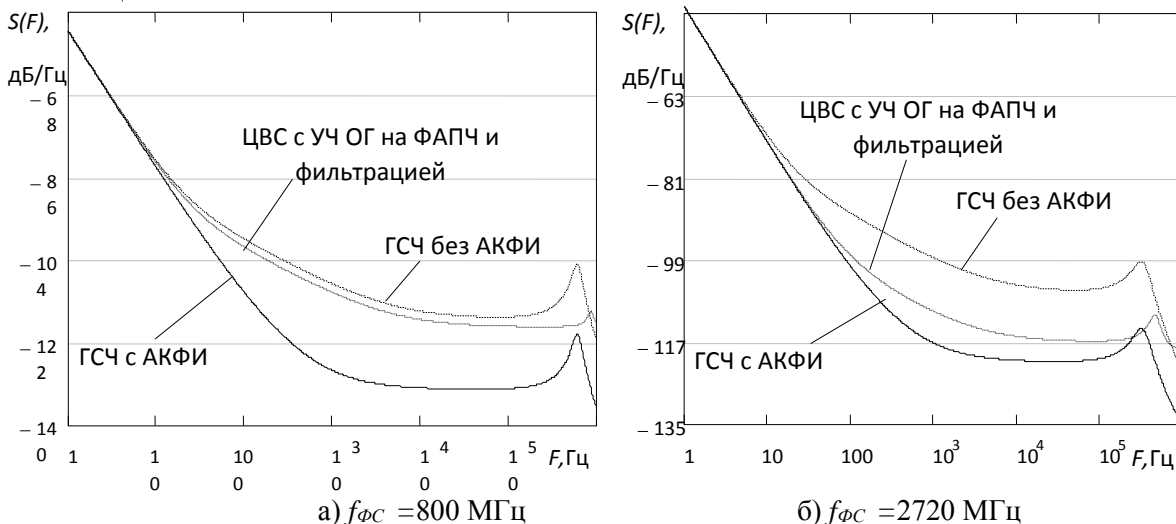


Рис. 2.

Наименьшим уровнем фазовых шумов обладает формирователь на основе гибридного синтезатора с ЦВС, охваченным цепью АКФИ [1-3]. В тоже время, используемая на практике схема с ЦВС и умножением опорной частоты на ФАПЧ обладает лучшими шумовыми характеристиками, чем гибридный синтезатор без автокомпенсации, за счет подавления фазовых шумов в выходном

## Секция 7. Машиностроение и материаловедение

сигнале формирователя с помощью фильтрации и меньшего умножения опорной частоты в петле ФАПЧ.

На рис. 3 представлен результат моделирования – графические зависимости СПМ фазовых флуктуаций на выходе исследуемых схем формирователей в зависимости от выходной частоты устройств с шагом 80 МГц. Сравнение проводилось при отстройке частоты 1 кГц.

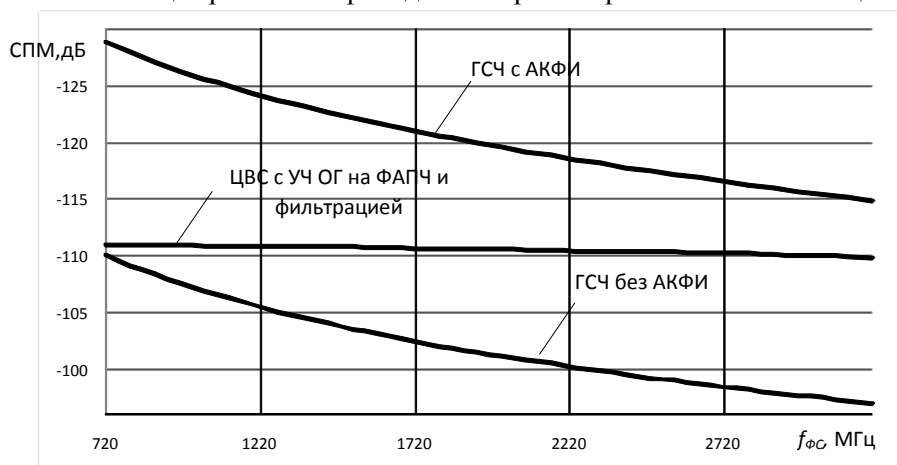


Рис.3.

Максимальная степень компенсации фазовых искажений ГСЧ с АКФИ относительно ФС с ЦВС и умножением опорной частоты на ФАПЧ в заданном диапазоне частот составляет 17.9 дБ, минимальная составляет 5.1 дБ.

Использование предложенных схем гибридных синтезаторов с АКФИ позволяет удовлетворить требования к формирователю с запасом, тем самым улучшив технические показатели радиотехнической системы, а также смягчить требования к параметрам блоков устройства.

### Литература

1. Surzhik D.I., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. Modeling the noise properties of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of phase noise of DDS // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. –Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. - IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.
2. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I., Kharchuk S.M. Modeling of noise properties of the signals former based on direct digital frequency synthesizer with autocompensating phase noise // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. –Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. - IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.
3. Vasilyev G.S., Surzhik D.I., Kurilov I.A., Kharchuk S.M. Suppression of the phase noise of signal formers on the basis of DDS and PLL // 25th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015). – Sevastopol, September 6 – 12, 2015. – pp. 209-211. – IEEE Catalog Number: CFP15788-PRT, CFP15788-CDR. – ISBNs: 978-1-4673-9413-0 (CD), 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. - Pp. 223-224.
4. Ромашов В. В., Ромашова Л. В., Храмов К. К., Докторов А. Н., Якименко К. А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2014. – С. 30-38.



С.М. Харчук, Г.С. Васильев, Д.И. Суржик, И.А. Курилов  
 Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета  
 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская, 23  
 E-mail: kh@mivlgu.ru

### Характеристики формирователя сигналов с ФАПЧ, ЦВС и автокомпенсацией помех

В настоящее время широкое распространение получили формирователи сигналов на основе цифровых вычислительных сигналов (ЦВС) с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) тактового сигнала ЦВС [1]. Применение автоматической компенсации помех позволяет уменьшить уровень помех выходного сигнала ЦВС и повысить качественные показатели формирователя. Принцип действия автоматического компенсатора помех (АКП) заключается в выделении закона помехи и противофазном управлении фазой и (или) амплитудой выходного сигнала ЦВС.

Предлагаемая схема формирователя (рис.1) реализует принцип комбинированного регулирования и имеет оптимизированный тракт опорного сигнала детекторов АКП. Схема содержит ОГ - опорный генератор, ИТ1 и ИТ2 – информационные тракты цепей регулирования по возмущению (РВ) и по отклонению (РО) соответственно, ФД1 и ФД2 – фазовые детекторы управляющих трактов, Ф1,2 и У1,2 – фильтры и усилители постоянного тока, С – сумматор, УФ – управляемый фазовращатель, ФВ - фазовращатель,  $\varepsilon_{ог}$ ,  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_{ц}$  и  $\varepsilon_y$  –дестабилизирующие факторы действующие соответственно на ОГ, ФАПЧ, ЦВС и УФ.

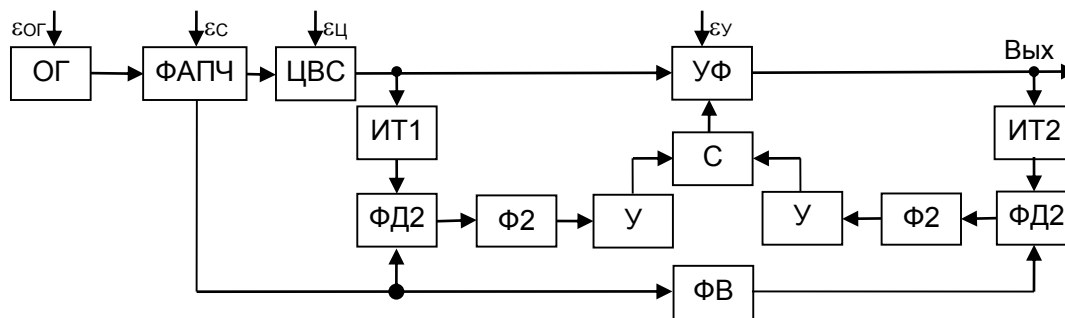


Рис.1.

Сигналы управляющих трактов складываются в С и противофазно управляют УФ. ФВ обеспечивает постоянный фазовый сдвиг для нормальной работы ФД2. Система ФАПЧ имеет выход после первого каскада делителя частоты с постоянным коэффициентом деления в цепи обратной связи системы. Этот сигнал является опорным сигналом для детекторов АКП.

На основе обобщенной схемы амплитудно-фазового преобразователя сигналов и аппарата непрерывных кусочно-линейных функций (НКЛФ) получены выражения передаточных характеристик формирователя, для четырех видов дестабилизирующих факторов  $\varepsilon_{ог}$ ,  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_{ц}$  и  $\varepsilon_y$ .

Управления для отклонения фазы выходного сигнала формирователя с АКП имеет вид

$$\varphi_2 = (\varepsilon_{ог}H_{\varepsilon_{ог}\varphi_{ог}} + \varepsilon_cH_{\varepsilon_c\varphi_c} + \varepsilon_{ц}H_{\varepsilon_{ц}\varphi_{ц}})H_{\varphi_1\varphi_2} + \varepsilon_{ц}H_{\varepsilon_{ц}\varphi_2} + \varphi_{Г}H_{\varphi_{Г}\varphi_2},$$

$$\varphi_{Г} = \varepsilon_{ог}H_{\varepsilon_{ог}\varphi_{ог}} + \varepsilon_cH_{\varepsilon_c\varphi_c},$$

где  $H_{x,y}$  – передаточные функции при воздействии  $x$  и отклике блока формирователя  $y$ .

$$H_{\varphi_{Г}\varphi_2} = \frac{n_1M_1(p)N_{1ms} + n_2M_2(p)N_{2mn}}{1 + n_2M_2(p)N_{2mn}},$$

где  $n_{1,2}$  – коэффициенты передачи У1,2,  $M_{1,2}(p)$  – коэффициенты передачи Ф1,2, коэффициенты  $p$  – оператор,  $N_{1,2ms,n}$  – коэффициенты передаточной характеристики,  $m$ ,  $s$  и  $n$  – текущие номера узлов аппроксимации характеристик УФ, ФД1 и ФД2.

Передаточные характеристики справедливы во всем диапазоне отклонений параметров и для любого вида нелинейностей составляющих формирователь блоков. По ним рассчитываются устойчивость, частотные и динамические характеристики формирователя.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-05542*

Литература

1. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М. Моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2, 2014. – С. 30-38.
2. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А., Коровин А.Н. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на интегральных микросхемах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013, №1. – С. 10-15.
3. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I., Kharchuk S.M. The analysis of the parametric sensitivity of a hybrid frequency synthesizer with autocompensating phase noise / 25th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015). – Sevastopol, September 6 – 12, 2015. – pp. 209-211. – IEEE Catalog Number: CFP15788-PRT, CFP15788-CDR. – ISBNs: 978-1-4673-9413-0 (CD), 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4.
4. Рудаков А.М., Курилов И.А., Харчук С.М., Романов Д.Н. Математическое моделирование автокомпенсации фазовых помех на выходе ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2 (10), 2013. – С. 19-25.